

中西非裂谷系形成的动力学机制

张庆莲¹, 侯贵廷², 潘校华³

(1. 河北地质大学资源学院, 河北 石家庄 050031;

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 中西非裂谷系是沿中非剪切带及邻区发育的一系列中生代裂谷盆地, 其成因机理一直存在争议。中西非裂谷系的构造演化主要经历了三个演化阶段, 其中在早白垩世进入强烈断陷期, 是盆地形成的重要阶段。以早白垩世中西非裂谷系的地质背景为基础, 运用弹性力学有限元数值模拟方法, 通过应力场和应变场的分析, 为中西非裂谷系形成的力学机制提供依据。模拟结果表明, 早白垩世非洲大陆内部走滑和伸展作用并存, 中非剪切带不是所谓的“转换断层”, 而是与中西非裂谷系同时形成和发育的构造。中西非裂谷系是在中生代泛大陆裂解时期, 非洲板块绕西北非地块逆时针旋转, 非洲内部不同地块在统一构造应力场作用下, 由于伸展和走滑的差异作用形成和发育的。

关键词: 中西非裂谷系; 中非剪切带; 早白垩世成盆; 有限元数值模拟; 力学机制

中图分类号: P542; P628.3

文献标识码: A

DYNAMIC MECHANISM OF RIFT SYSTEMS IN WEST AND CENTRAL AFRICA

ZHANG Qinglian¹, HOU Guiting², PAN Xiaohua³

(1. College of Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China;

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Petro-China Exploration & Development Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: The rift systems in West and Central Africa that developed along the shear zone in Central Africa is a series of Mesozoic-Cenozoic rift basins, and their formation mechanism is still a matter of debate. The evolution of those rift systems has three stages, and Early Cretaceous is the most important one for the basin formation, in which the rifts and major fault zones were strongly active. Based on the geological setting of rift systems in West and Central Africa in Early Cretaceous, using linear elastic theory with two dimensional finite element numerical simulation, through the analysis of the stress field and the strain field, reliable evidence to the mechanical mechanism of rift systems are produced. The simulation results suggest that strike-slipping and extensional process coexist in African continent in Early Cretaceous, and the shear zone in Central Africa is not a “transform fault” but a structure that formed and developed simultaneously with the rift systems in West and Central Africa. In Mesozoic-Cenozoic Pangea

基金项目: 中石油勘探开发研究院和国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB219302); 河北地质大学博士科研启动基金项目(BQ201602)

作者简介: 张庆莲(1986-), 女, 讲师, 博士, 主要从事构造地质和石油地质学的研究工作。E-mail: w3715028779@126.com

通讯作者: 侯贵廷(1964-), 男, 教授, 主要研究方向为地球动力学。E-mail: gthou@pku.edu.cn

收稿日期: 2017-04-13; **修回日期:** 2018-02-23

范二平编辑

disintegration period, due to the different motion rates of the three blocks along parallel slip vectors under the unified tectonic stress field and the counterclockwise rotation around WB by African plate, rift systems were formed and developed.

Key words: rift systems in West and Central Africa; shear zone in Central Africa; Early Cretaceous basin-forming; finite element numerical simulation; mechanical mechanism

0 引言

中西非裂谷含油气区的许多盆地很早就有油气发现,近10年来,各大石油公司都取得了重要的勘探进展,该区具有良好的油气开发前景,必将成为非洲未来的主要油气产区之一。中西非裂谷系是沿中非剪切带及邻区发育的一系列中生代裂谷盆地,其成因机制一直存在争议。一种观点认为中非剪切构造带是“转换断层”,中西非裂谷系是该转换断层走滑诱导形成的中生代陆内裂谷盆地群^[1~2];另一种观点认为中西非裂谷系是早白垩世南大西洋扩张构造背景下形成的裂谷盆地^[3~5]。哪种观点能够更合理地解释中西非裂谷系的成因,需要进一步开展中西非裂谷系形成的动力学机制研究。

对中西非裂谷系的构造演化和成因机制相关学者做了很多研究。Pindell & Dewey 通过古地磁数据认为西非在中生代泛大陆解体过程中是稳定的,非洲板块内部存在板内变形^[6]。Guiraud & Maurin 将非洲板块划分为东北非地块、西北非地块和中南非地块三部分^[4,7~8],整个非洲板块内部存在变形,且各个分板块之间的变形量也存在差异。Pauoni 认为自三叠纪开始,非洲大陆一直处于伸展的地质环境,中西非裂谷系是在拉伸过程中的张性构造应力场下形成的^[7~9]。Binks & Fairhead 和 Ziegler 研究认为自中侏罗世开始泛大陆裂解,在其裂解过程中非洲大陆开始形成^[10~13]。Moulin 应用 PLACA 软件对非洲板块开展恢复重建,并计算得出了非洲板块内部不同位置的伸展量或走滑量^[14]。以上研究成果为中西非裂谷系形成的动力学机制研究提供了详细的地质学基础。

目前对中西非裂谷系的研究主要集中在地质、地球物理和构造演化模式等方面^[15~17],往往仅限于形态学和运动学分析,缺乏中西非裂谷系形成力学机制方面的研究。现以中非剪切带和中非裂谷盆地群的地质模型为基础,通过弹性力学有限

元数值模拟方法,研究中西非裂谷系形成的力学机制,探讨其合理的成因模式。

1 地质背景

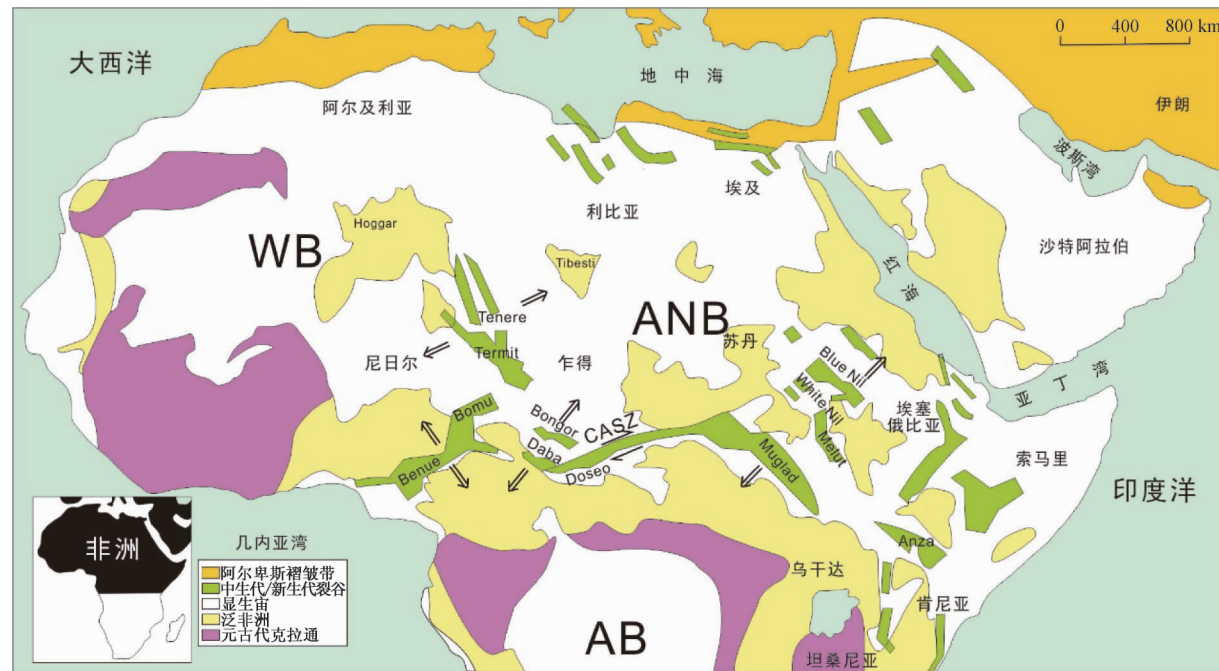
中西非裂谷系位于非洲北部和中部的苏丹、乍得和尼日尔境内,是沿中非剪切带及邻区发育的一系列中生代裂谷盆地^[18~24]。右旋的中非剪切带位于非洲中部(见图1),是东北非地块与中非非洲地块之间的活动带,是非洲大陆内部重要的陆块界线。

中西非裂谷系可以进一步分为两个走向不同的盆地群:近东西走向的盆地群包括 Benue、Bomu、Doseo、Salamat 和 Bagarra 等盆地;北西走向的盆地群包括 Mugald、Mulet、Tenere、White Nile、Termit、Bongor、Doba 和 Bule Nile 等盆地(见图1)^[22]。

大西洋张开活动对非洲大陆内部构造的影响不同学者有不同的认识。Pindell & Dewey 认为非洲大陆可分为东非和西北非两部分^[6],西北非相对东非较为稳定;Guiraud & Maurin 和 Schettino & Scotese 认为非洲可划分为三个部分,即东北非、西北非和中南非,同样认为西北非相对其他两个地块较为稳定^[4,15](见图2)。后者的方案得到了 Moulin 的进一步论证^[14],因此以 Guiraud & Maurin^[4]和 Schettino & Scotese^[15]的观点为基础,将非洲板块进一步划分为东北非地块、西北非地块和中南非地块三部分。

西北非地块和东北非地块之间的断裂带呈左旋走滑特征,东北非地块和中南非地块之间是右旋走滑断裂,由于各个陆块稳定性和活动性的差异,在泛大陆解体过程中产生了中西非裂谷系(见图1、图2)。

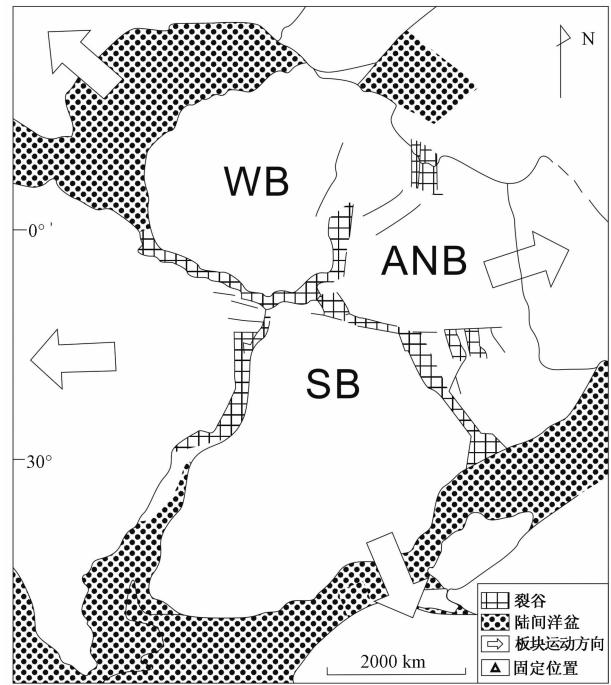
整个非洲大陆是由若干克拉通沿泛非期造山带拼合而成的大陆。西北非地块的古地磁数据证明其在非洲大陆中生代构造演化过程中相对比较稳定(见图2)^[15],没有较大的偏移,以前寒武纪



WB—西北非地块；ANB—东北非地块；AB—中南非地块；CASZ—中非剪切带

图 1 非洲北部裂谷分布图^[2]

Fig. 1 Distribution map of the rifts in North Africa



WB—西北非地块；ANB—东北非地块；SB—中南非地块

图 2 早白垩世泛大陆裂解时期非洲裂谷系分布图^[15]

Fig. 2 Distribution of the rife systems in Africa in Early Cretaceous Pangea distintegration period

花岗质克拉通基底为主，内部裂谷不发育，仅发育克拉通型盆地。在泛大陆解体过程中，中南非

地块向东南运动，以前寒武纪花岗质基底为主，裂谷相对不发育，仅发育克拉通型盆地^[23~25]。东北非地块在泛大陆裂解过程中向北东运动，在克拉通基底之上沿中非剪切带发育大量的中新生代裂谷^[26~29]。在这三个地块中，东北非地块在中新生代活动最强烈。

自泛非期以来，中非裂谷系盆地基本上经历了以下三个的构造演化阶段^[1~4, 16, 24~27]。

(1) 晚侏罗世，非洲大陆的西北部较为稳定，而东北部和南部随着泛大陆的裂解开始向东漂移，早期裂谷在三个次级陆块边界开始发育，同时形成中非剪切带和北东东向右行走滑断裂带^[7~8]。

(2) 早白垩世，断裂活动强烈，中非裂谷系进入强烈的断陷期，同时沉积了巨厚的下白垩统地层。此时，非洲板块的西北部仍处于较为稳定的状态，南部和东北部仍向东漂移，在中非剪切带持续的右行走滑和各地块之间差异活动的共同作用下，沿中非剪切带内及附近派生出 Muglad、Melut、Blue Nile、White Nile、Baggara、Doba、Bongar 和 Termit 等裂谷盆地^[7~8]。

(3) 晚白垩世，裂谷进入拗陷期，中非剪切带走滑作用强度由西向东变弱。古近纪中非剪切带停止活动。

早白垩世盆地进入强裂陷期，是盆地形成发育的主要时期，文中以早白垩世中非剪切带和中西非裂谷系为构造背景，运用弹性力学有限元数值模拟方法对早白垩世非洲大陆进行应力场模拟分析。

中西非裂谷系的演化阶段与南大西洋扩张史和非洲大陆的漂移史密切相关^[30~42]。中非裂谷系是在泛大陆解体过程中形成的，在侏罗纪末，泛大陆解体，南大西洋和印度洋开始张开，南大西洋的打开是从南端开始的。中生代非洲大陆的西北非陆块相对固定，东北非在向东北漂移的过程中，中南部非洲大陆也同时发生逆时针旋转（见图2）。

2 动力学模拟及分析

基于早白垩世中非裂谷盆地群构造特征建立基础的地质模型，应用有限元数值模拟方法^[43~44]，通过 ANSYS13.0 软件对中西非裂谷系强烈裂陷期（早白垩世）进行动力学模拟，分析其应力场和应变场，进而研究早白垩世中西非裂谷系形成发育的动力学机制。

2.1 建立模型

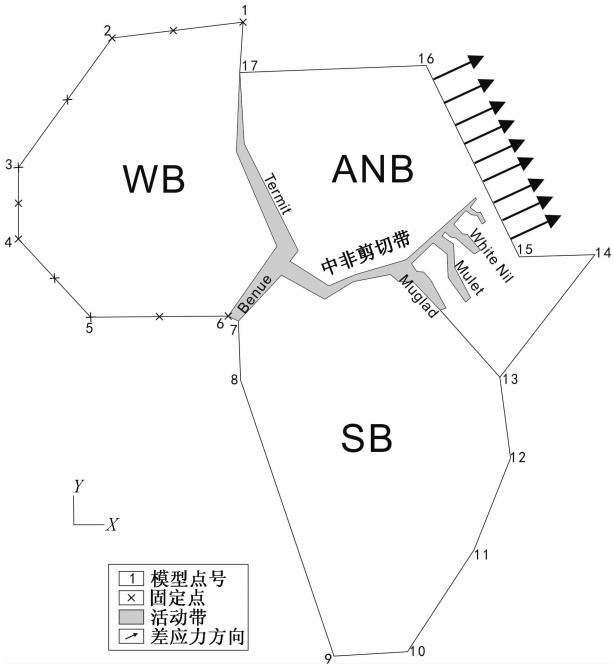
以前面概述的非洲大陆三个次级地块的划分及其中生代泛大陆的裂解过程作为应力场计算的地质模型（见图2），将地质模型进行简化，得到具有一定厚度的平面薄板几何模型，不考虑垂向变化对模型的影响。

在此几何模型基础上设定边界条件并对三个地块和活动带赋予岩石力学参数值（见表1），建立早白垩世非洲大陆的力学模型（见图3）。根据西北非地块稳定的特性，将西北非地块设为固定边界。如果在中南非地块施加拉张力，由于西北非地块固定，东北非处于挤压状态，与实际地质情况不符合，因此不考虑在中南非地块施加拉张力。根据东北非地块活动性强和向东北漂移的特征，在东北非地块的东北边界（红海西岸）施加拉张的差应力 80 MPa（见图3），差应力值参照板块运动作用力^[45~46]。

表 1 各构造分区的岩石力学参数表

Table 1 Rock mechanics parameters in different structural area			
构造分区	岩性	杨氏模量/ × 10 ⁹ Pa	泊松比
西北非	花岗岩	100	0.25
中南非	花岗岩	100	0.25
东北非	花岗岩	100	0.25
活动带（剪切带及裂谷系）	断层岩	15	0.14

注：岩石力学参数根据 Hou et al.^[45] 的数据取平均值得出



WB—西北非地块；ANB—东北非地块；SB—中南非地块

图 3 早白垩世数值模拟力学模型图（灰色区为活动带）
Fig. 3 Mechanical model of the numerical simulation in the Early Cretaceous

在早白垩世非洲大陆的力学模型中（见图3），西北非地块、东北非地块和中南非地块主要是以花岗岩为主的前寒武系结晶基底，参考花岗岩的岩石力学参数（见表1）；中非剪切带及中西非裂谷系设为活动带，发育断层，参考断层岩的岩石力学参数（见表1）。

2.2 应变场结果与分析

根据上述建立的早白垩世非洲大陆的薄板力学模型，利用弹性力学有限元数值模拟软件计算获得张应变等值线图（见图4）。

早白垩世非洲大陆的张应变等值线图表明张应变主要集中在非洲大陆的活动带。最大的张应变集中在 Benue 裂谷，其次集中在 Termit 裂谷，而 White Nile 裂谷和中非剪切带的张应变相对较低且相近（见图4）。

Moulin^[14] 基于盆地分析和地球物理数据利用 PLACA 软件获得的中非剪切带的滑移量及其附近裂谷的伸展量为验证文中获得的张应变场结果提供了有力证据：Benue 裂谷的伸展量约 95 km，Termit 裂谷伸展量约 60 km，White Nile 裂谷的伸展量约 50 km，中非剪切带的滑移量约 40 km。Benue、Termit、White Nile、中非剪切带的伸展量或滑移量依次由大至小（见图5）。

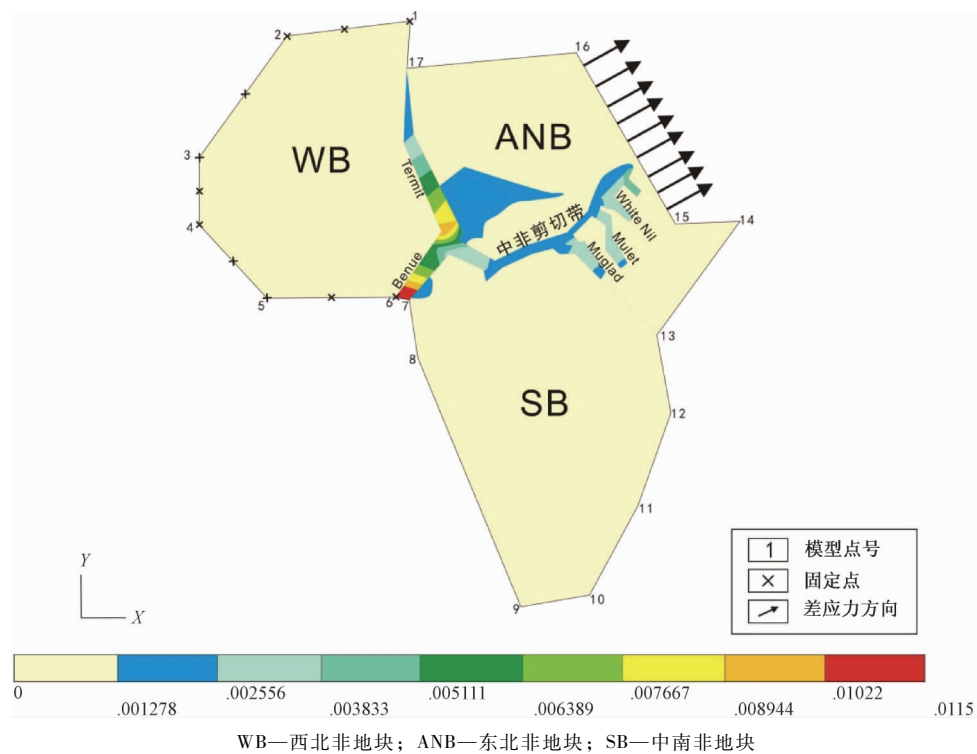


图 4 早白垩世非洲大陆的张应变等值线图

Fig. 4 Contour map of tensile strain in the Early Cretaceous African continent

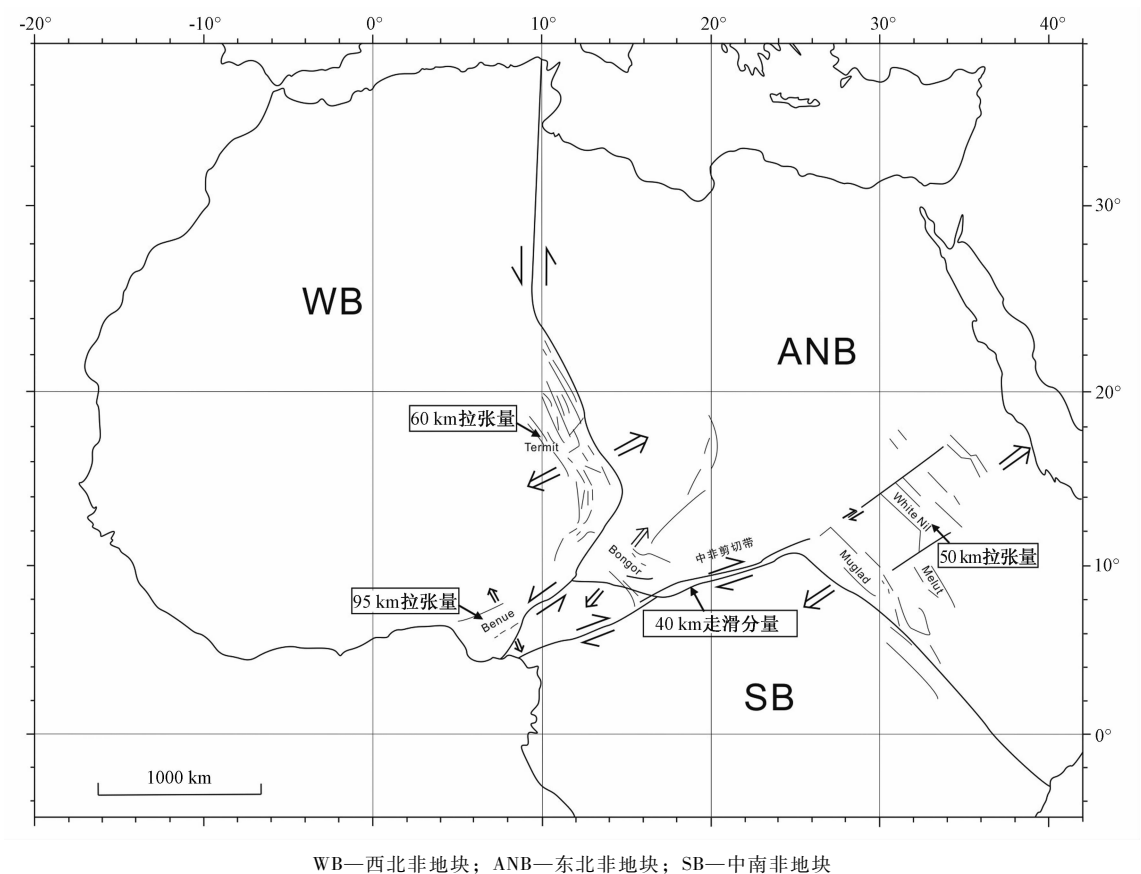


图 5 非洲裂谷系白垩纪伸展量或滑移量图^[14]

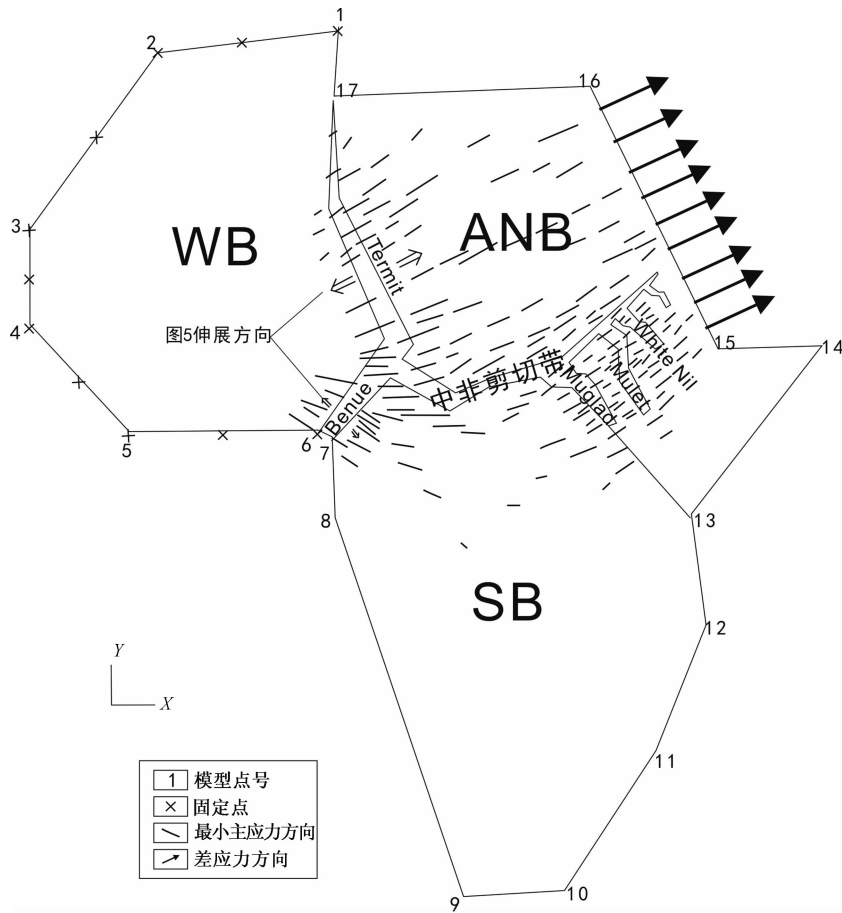
Fig. 5 Extension and slip map of African rift systems in Cretaceous

在计算得到的早白垩世非洲大陆的张应变等值线图中，Benue 裂谷、Termit 裂谷、White Nile 裂谷和中非剪切带的张应变依次由高至低分布，与Moulin^[14]根据实际资料获得的伸展量或滑移量分布规律一致，说明中非剪切带及附近的裂谷系是早白垩世非洲大陆在泛大陆裂解过程中绕西北非地块逆时针旋转构成的构造应力场条件下形成的。

2.3 应力场结果与分析

根据早白垩世非洲大陆的最小主压应力方向图分析（见图 6），最小主压应力方向代表区域拉

张方向，且区域拉张方向与相应位置的裂谷系的伸展方向一致，例如：Benue 裂谷的伸展方向与张应力的方向一致均为北西—南东向；Bangor 裂谷（见图 5）的伸展方向为北东—南西向，与张应力方向一致；Termit、Muglad、White Nile 的伸展方向与该区域的张应力方向吻合，为北东东—南西西向（见图 5、图 6）；中非剪切带最小主压应力方向与其呈小角度斜交，指示为右旋走滑，与图 5 所示方向一致；Termit 以北地区最小主压应力方向指示为左旋走滑，与实际（见图 5）符合。



WB—西北非地块；ANB—东北非地块；SB—中南非地块

图 6 早白垩世非洲大陆的最小主压应力方向图

Fig. 6 The minimum principal compressive stress (σ_{Hmin}) trajectory map of the African continent in Early Cretaceous

模拟得到的早白垩世中西非裂谷系的区域张应力方向与该地区的裂谷伸展和走滑方向吻合，说明以早白垩世非洲大陆绕西北非地块逆时针旋转来建立地质模型是合理的。这说明中非剪切带和中西非裂谷系是在中生代晚期泛大陆裂解过程中非洲大陆统一的构造应力场环境下产生和发育的，该时期非洲大陆内部走滑和伸展作用并存，进一步说明了中非剪切带不是所谓的“转换断

层”，而是与中西非裂谷系同时形成和发育的构造。

模拟结果与地质事实吻合，说明随着泛大陆的解体及南大西洋的打开，非洲板块内部的东北非地块、西北非地块和中南非地块之间存在相对运动，其中，西北非地块较为稳定，东北非在张性力作用下向北东向漂移，中南非地块在拉张作用力下向南西漂移。

3 结论

中非剪切带及其附近的裂谷系作为非洲大陆内部重要的陆块界线,将非洲大陆分为西北非、东北非和中南非三大地块。在泛大陆解体过程中,南大西洋从南端开始打开。

(1) 根据以上地质背景,利用弹性力学有限元数值模拟计算得到的早白垩世中西非最小主压应力方向代表区域张应力方向,区域张应力方向与该地区的裂谷伸展和走滑方向吻合,说明早白垩世非洲大陆绕西北非地块逆时针旋转的构造模式是合理的。

(2) 计算得到的早白垩世非洲大陆的张应变等值线图中各裂谷的张应变值分布规律与实际资料获得的伸展量或滑移量的分布规律是总体一致的,中非剪切带及附近的裂谷系是在早白垩世非洲大陆绕西北非地块逆时针旋转构成的构造应力场条件下形成的。这说明中非剪切带和中西非裂谷系是在中生代晚期泛大陆裂解过程中非洲大陆统一的构造应力场环境下形成和发育的。

(3) 通过有限元数值模拟研究认为,“中非剪切带”是与中西非裂谷系同时形成和发育的“变换断裂”,即走滑和伸展共同作用下形成的断裂,不是与大西洋中脊“转换断层”相关或“转换断层”向大陆北部的延伸。

(4) 中生代非洲大陆的西北非地块相对稳定,东北非地块受到北东向拉张作用向北东漂移,在东北非漂移的过程中中南非地块也同时向西南漂移,发生逆时针旋转。

参考文献/References

- [1] Genik G J. Regional framework, structural and petroleum aspects of rift basins in Niger, Chad and the Central African Republic (C. A. R.) [J]. *Tectonophysics*, 1992, 213 (1/2): 169 ~ 185.
- [2] Mohamed A Y, Pearson M J, Ashcroft W A, et al. Modeling petroleum generation in the Southern Muglad rift basin, Sudan [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83 (12): 1943 ~ 1964.
- [3] Guiraud R, Mbaigane J C D, Carretier S, et al. Evidence for a 6000 km length NW-SE-striking lineament in northern Africa: the Tibesti Lineament [J]. *Journal of the Geological Society*, 2000, 157 (5): 897 ~ 900.
- [4] Guiraud R, Maurin J C. Early cretaceous rifts of Western and Central Africa: an overview [J]. *Tectonophysics*, 1992, 213 (1/2): 153 ~ 168.

- [5] Guiraud R, Bellion Y, Benkhelil J, et al. Post-Hercynian tectonics in Northern and Western Africa [J]. *Geological Journal*, 1987, 22 (S2): 433 ~ 466.
- [6] Pindell J, Dewey J F. Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico & Caribbean region [J]. *Tectonics*, 1982, 1 (2): 179 ~ 211.
- [7] Pavoni N. Pattern of mantle convection and Pangea break-up, as revealed by the evolution of the African plate [J]. *Journal of the Geological Society*, 1993, 150 (5): 953 ~ 964.
- [8] 张庆莲, 侯贵廷, 潘校华, 等. Termit 盆地构造变形的力学机制 [J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37 (3): 377 ~ 383. ZHANG Qinglian, HOU Guiting, PAN Xiaohua, et al. Mechanics of Termit basin in Central Africa rift systems [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37 (3): 377 ~ 383. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张庆莲, 侯贵廷, 潘校华, 等. Muglad 盆地形成力学机制的有限元数值模拟 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2013, 49 (6): 981 ~ 985. ZHANG Qinglian, HOU Guiting, PAN Xiaohua, et al. Mechanics of Muglad basin in Central Africa Rift systems: a Paleostress field modeling [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49 (6): 981 ~ 985. (in Chinese with English abstract)
- [10] Binks R M, Fairhead J D. A plate tectonic setting for Mesozoic rifts of West and Central Africa [J]. *Tectonophysics*, 1992, 213 (1/2): 141 ~ 151.
- [11] Ziegler P A. Late Cretaceous and Cenozoic intra-plate compressional deformations in the Alpine foreland—a geodynamic model [J]. *Tectonophysics*, 1987, 137 (1/4): 389 ~ 420.
- [12] Ziegler P A. Evolution of Laurussia: a study in late Palaeozoic plate tectonics [M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic, 1989.
- [13] Ziegler P A. Plate tectonics, plate moving mechanisms and rifting [J]. *Tectonophysics*, 1992, 215 (1/2): 9 ~ 34.
- [14] Moulin M, Aslanian D, Unternehr P. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 98 (1/2): 1 ~ 37.
- [15] Schettino A, Scotese C R. Apparent polar wander paths for the major continents (200 Ma to the present day): a palaeomagnetic reference frame for global plate tectonic reconstructions [J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 163 (2): 727 ~ 759.
- [16] Jacques J M. A tectonostratigraphic synthesis of the Sub-Andean basins: inferences on the position of South American intraplate accommodation zones and their control on South Atlantic opening [J]. *Journal of the Geological Society*, 2003, 160 (5): 703 ~ 717.
- [17] 刘剑平, 潘校华, 马君, 等. 西部非洲地区油气地质特征及资源概述 [J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35 (3): 378 ~ 384. LIU Jianping, PAN Xiaohua, MA Jun, et al. Petroleum geology and resources in West Africa: an overview [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35 (3): 378 ~ 384. (in Chinese with English abstract)
- [18] 江文荣, 李允, 蔡东升, 等. 非洲油气勘探区战略选择建议 [J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33 (3): 388 ~ 392.

- JIANG Wenrong, LI Yun, CAI Dongsheng, et al. Recommendations on strategic selection of exploration areas in Africa [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33 (3): 388 ~ 392. (in Chinese with English abstract)
- [19] Genik G J. Petroleum geology of cretaceous-tertiary rift basins in Niger, chad, and central African Republic [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77 (8): 1405 ~ 1434.
- [20] Morley C K. Patterns of displacement along large normal faults: implications for basin evolution and fault propagation, based on examples from East Africa [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83 (4): 613 ~ 634.
- [21] 童晓光, 窦立荣, 田作基, 等. 苏丹穆格莱特盆地的地质模式和成藏模式 [J]. *石油学报*, 2004, 25 (1): 19 ~ 24.
TONG Xiaoguang, DOU Lirong, TIAN Zuoj, et al. Geological mode and hydrocarbon accumulation mode in Muglad passive rift basin of Sudan [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25 (1): 19 ~ 24. (in Chinese with English abstract)
- [22] Eagles G, König M. A model of plate kinematics in Gondwana breakup [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 173 (2): 703 ~ 717.
- [23] Bumby A J, Guiraud R. The geodynamic setting of the Phanerozoic basins of Africa [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 43 (1/3): 1 ~ 12.
- [24] Janssen M E, Stephenson R A, Cloetingh S. Temporal and spatial correlations between changes in plate motions and the evolution of rifted basins in Africa [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1995, 107 (11): 1317 ~ 1332.
- [25] 窦立荣. 苏丹迈努特盆地油气成藏机理和成藏模式 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24 (1): 50 ~ 57.
DOU Lirong. Formation Mechanism and model of oil and gas accumulations in the Melut basin, Sudan [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, 24 (1): 50 ~ 57. (in Chinese with English abstract)
- [26] Turner J P, Rosendahl B R, Wilson P G. Structure and evolution of an obliquely sheared continental margin: Rio Muni, West Africa [J]. *Tectonophysics*, 2003, 374 (1/2): 41 ~ 55.
- [27] Dickson W G, Fryklund R E, Odegard M E, et al. Constraints for plate reconstruction using gravity data—implications for source and reservoir distribution in Brazilian and West African margin basins [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20 (3/4): 309 ~ 322.
- [28] Contrucci I, Matias L, Moulin M, et al. Deep structure of the West African continental margin (Congo, Zaïre, Angola), between 5 S and 8 S, from reflection/refraction seismics and gravity data [J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 158 (2): 529 ~ 553.
- [29] Aslanian D, Moulin M, Olivet J L, et al. Brazilian and African passive margins of the central Segment of the South Atlantic Ocean: kinematic constraints [J]. *Tectonophysics*, 2009, 468 (1/4): 98 ~ 112.
- [30] 窦立荣, 肖坤叶, 胡勇, 等. 乍得 Bongor 盆地石油地质特征及成藏模式 [J]. *石油学报*, 2011, 32 (3): 379 ~ 386.
DOU Lirong, XIAO Kunye, HU Yong, et al. Petroleum geology and a model of hydrocarbon accumulations in the Bongor Basin, the Republic of Chad [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32 (3): 379 ~ 386. (in Chinese with English abstract)
- [31] Fairhead J D, Green C M. Controls on rifting in Africa and the regional tectonic model for the Nigeria and East Niger rift basins [J]. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 1989, 8 (2/4): 231 ~ 249.
- [32] Macdonald D, Gomez-Perez L, Franzese J, et al. Mesozoic break-up of SW Gondwana: implications for regional hydrocarbon potential of the southern south Atlantic [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20 (3/4): 287 ~ 308.
- [33] Karner G D, Driscoll N W. Tectonic and stratigraphic development of the West African and eastern Brazilian Margins: insights from quantitative basin modelling [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1999, 153 (1): 11 ~ 40.
- [34] Eagles G. New angles on South Atlantic opening [J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 168 (1): 353 ~ 361, doi: 10. 1111/j. 1365-246X. 2006. 03206. x.
- [35] Fairhead J D. Mesozoic plate tectonic reconstructions of the central south Atlantic Ocean: the role of the west and central African rift system [J]. *Tectonophysics*, 1988, 155 (1/4): 181 ~ 191.
- [36] Fairhead J D, Binks R M. Differential opening of the central and south Atlantic oceans and the opening of the west African rift system [J]. *Tectonophysics*, 1991, 187 (1/3): 191 ~ 203.
- [37] Fairhead J D. The structure of the lithosphere beneath the Eastern Rift, East Africa, deduced from gravity studies [J]. *Tectonophysics*, 1976, 30 (3/4): 269 ~ 298.
- [38] Fairhead J D. Geophysical controls on sedimentation within the African Rift Systems [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1986, 25 (1): 19 ~ 27.
- [39] Fairhead J D, Henderson N B. The seismicity of southern Africa and incipient rifting [J]. *Tectonophysics*, 1977, 41 (4): T19 ~ T26.
- [40] Fairhead J D, Okereke C S. Depths to major density contrasts beneath the West African Rift System in Nigeria and Cameroon based on the spectral analysis of gravity data [J]. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 1988, 7 (5/6): 769 ~ 777.
- [41] Wilson M, Guiraud R. Magmatism and rifting in Western and Central Africa, from Late Jurassic to Recent times [J]. *Tectonophysics*, 1992, 213 (1/2): 203 ~ 225.
- [42] Lambiase J J. The framework of African rifting during the Phanerozoic [J]. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 1989, 8 (2/4): 183 ~ 190.
- [43] Cai Y E, Wang C Y. Fast finite-element calculation of gravity anomaly in complex geological regions [J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 162 (3): 696 ~ 708.
- [44] He J K, Xia W H, Lu S J, et al. Three-dimensional finite element modeling of stress evolution around the Xiaojiang fault system in the southeastern Tibetan plateau during the past ~ 500 years [J]. *Tectonophysics*, 2011, 507 (1/4): 70 ~ 85.
- [45] Hou G T, Kusky T M, Wang C C, et al. Mechanics of the giant radiating Mackenzie dyke swarm: a paleostress field modeling [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115 (B2): B02402, doi: 10. 1029/2007JB005475.
- [46] Hou G T, Wang C C, Li J H, et al. Late Paleoproterozoic extension and a paleostress field reconstruction of the North China Craton [J]. *Tectonophysics*, 2006, 422 (1/4): 89 ~ 98.